

Підтверджено, що добавка азоту до вогнегасного аерозолі значно підвищує вогнегасну ефективність отриманої бінарної аерозольно-азотної суміші, та приводить до зменшення концентрацій компонентів суміші до 30 %. Визначено оптимальні співвідношення компонентів суміші аерозолі – 10 г/м³ та азоту – 12,1 %, при яких суміш є вогнегасною для дифузійного полум'я гептану та життєпридатною для людей

Ключові слова: азот, газы флегматизатори, інгібітори горіння, аерозольне пожежогасіння

Подтверждено, что добавка азота к огнетушащему аэрозолю значительно повышает огнетушащую эффективность полученной бинарной аерозольно-азотной смеси и приводит к уменьшению концентраций компонентов смеси до 30 %. Определены оптимальные соотношения компонентов смеси аэрозоля – 10 г/м³ и азота – 12,1 %, при которых смесь является огнетушащей для диффузионного пламени гептана и жизнепригодной для людей

Ключевые слова: азот, газы флегматизаторы, ингибиторы горения, аерозольное пожаротушение

1. Вступ

У практиці пожежогасіння в закритих приміщеннях одним з найбільш ефективних є спосіб придушення пожежі, при якому у всьому об'ємі, що захищається, створюється середовище, що не підтримує процес горіння. До теперішнього часу для цього в якості вогнегасних речовин широко використовувалися газові інертні розріджувачі, або хімічно активні галогенвуглеводні – хладони. Однак інертні розріджувачі мають низьку вогнегасну здатність, а хладони сприяють руйнуванню озонового шару Землі. Вогнегасні порошкові склади малоефективні при об'ємному способі гасіння пожеж через великий розмір часток і нерівномірний розподіл по захищуваному об'ємі. У зв'язку з цим перспективним є новий різновид засобів об'ємного пожежогасіння – піротехнічні аерозолеутворювальні вогнегасні суміші (АУС) та генератори вогнегасного аерозолі на їх основі. Сучасні аерозольні засоби за основними техніко-економічними показниками (висока вогнегасна здатність, автономність, можливість автоматичного приведення в дію, простота в експлуатації, мінімальні збитки при застосуванні) технологічно перевершують всі засоби, що використовуються для гасіння пожежі. При цьому в двофазовій системі аерозолі газоподібна фаза, це як правило, суміш інертних газів, яка не підтримує горіння, а тверда фаза – свіжоу-

УДК 614.841

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.72399

ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕГАСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТИХ БІНАРНИХ АЕРОЗОЛЬНО- АЗОТНИХ СУМІШЕЙ

В. М. БаланюкКандидат технічних наук, доцент,
полковник служби цивільного захистуВідділ ад'юнктури та докторантури
Львівський державний університет

безпеки життєдіяльності

вул. Клепарівська, 35, м. Львів, Україна, 79000

E-mail: bagr33@ukr.net

Н. М. КозярКандидат технічних наук, заступник начальника,
підполковник служби цивільного захисту*

E-mail: Kozyar777@ukr.net

О. І. Гарасим'юк

Майор служби цивільного захисту*

E-mail: Garas777@ukr.net

*Головне Управління ДСНС України у м. Києві
вул. Володимирська, 13, м. Київ, Україна, 01601

творені високодисперсні тверді частинки неорганічних солей, що мають високу вогнегасну здатність. Крім того, в зв'язку з кліматичними змінами на планеті, зараз гостро стоїть питання обмеження викиду CO₂, хладонів та інших парникових газів в атмосферу. Заміна CO₂ та хладонів, які на даний час використовують для гасіння пожеж класів А, В, С, Е, через їх шкідливий вплив на клімат та екологічну чистоту планети а також озоновий шар, є актуальною проблемою, яка потребує як найскорішого вирішення.

Таким чином, актуальність роботи полягає в тому, що на даний час відсутні екологічно чисті, дешеві, прості у виробництві та експлуатації засоби пожежогасіння з високою вогнегасною ефективністю, які можна застосовувати навіть для гасіння об'ємів з тимчасовим перебуванням людей та живих організмів без завдання видимої шкоди для них в результаті заповнення об'єму зазначеними вогнегасними засобами.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Вогнегасний аерозоль одержують спалюванням АУС, які складаються з окисника, як правило, KNO₃, KClO₄ чи їх суміші і відновника пального – епоксидної смоли, ідітолу, каучуку і т. д. Висока ефективність цих сумішей пояснюється утворенням високодисперсної

конденсованої фази з розміром частинок 1 мкм і менше. Оскільки конденсована фаза – це такі солі, як K_2CO_3 , KOH , KCl та інші, то деякі дослідники схильні вважати, що механізм дії аерозолі подібний до механізму дії вогнегасних порошоків [1, 2], а підвищення ефективності аерозолі можна досягнути шляхом збільшення газифікації вихідних компонентів рецептур АУС з максимально можливим вмістом інертних газових розріджувачів (азот, CO_2 , водяна пара) причому збільшення газифікації аерозолі [3] сприяє підвищенню їх вогнегасної ефективності.

Основним загальним недоліком для більшості аерозольотворюючих сумішей є їх порівняно високі вогнегасні концентрації та досить високі температури горіння. Більшість з цих складів являють собою багатокомпонентні суміші, що збільшує собівартість складу, та ускладнює їх виготовлення та зберігання. Наприклад відомий склад [4], який містить в основі нітрат калію (38–80 %), перхлорат калію (30–45 %), в якості горючого – сажу (10–19,5 %), ідітол (0,5–1,5 %), гіпс (5–13 %), портландцемент (10,5 %), рідке скло (17–45 %), натрію бутілнафталін, КМЦ (0,6–0,1 %), оксид міді (2 %), оксид цинку (4 %), оксид заліза (0,5–1 %). Вогнегасна концентрація аерозолі, отриманого з таких АУС, становить 59–133 г/м³, що є на рівні деяких вогнегасних порошкових засобів. Зараз паралельно з вогнегасними аерозолями для об'ємного гасіння застосовують інертні розріджувачі. Інертні розріджувачі – група газових вогнегасних речовин, до яких, зокрема, входять діоксид вуглецю, азот, аргон та їх суміші, – нетоксичні, які не утворюють токсичних продуктів термічного розкладу, не руйнують озоновий шар та є більш доступними і дешевими, ніж хладони та деякі інгібітори горіння. Оскільки в рамках Монреальського протоколу [5] виробництво хладонів було припинено у всіх розвинених країнах, питання заміни їх постало в багатьох дослідних центрах та інститутах світу. Однією з перших газових вогнегасних речовин, яку було запропоновано, як альтернативу хладонам, – був діоксид вуглецю (CO_2).

Але згідно з Монреальським та Кіотським протоколом [5, 6], CO_2 відноситься до парникових газів, викид яких регламентується, а дослідження щодо інноваційних екологічно-безпечних технологій є пріоритетними та відповідають пункту 4 статті 2 протоколу. Тому, з метою зменшення викиду цього газу в атмосферу, для забезпечення флегматизувальної ефективності газоаерозолів доцільно використовувати азот N_2 , який широко використовується в якості екологічно чистого флегматизувального та вогнегасного агента. Треба зазначити, що на даний час створено досить велику кількість альтернативних хладонам засобів гасіння [3, 7, 8]. Однак, більшість з них все ж не дають можливості говорити про абсолютну простоту експлуатації, дешевизну, а головне екологічну чистоту. Азот, як вогнегасний агент володіє «цінними» характеристиками – хімічно нейтральний до більшості речовин, недорогий, не дефіцитний, молярна густина – 28,01 г/моль, що дає змогу рівномірно заповнювати об'єм, при цьому вогнегасна концентрація N_2 для н-гептану (C_7H_{16}) становить 33 %, [9]. Азот широко застосовується, для різноманітних систем пожежогасіння. Зокрема, існують установки як на території України, так і за кордоном в яких цей

газ покладений в основу за принципом витіснення кисню. В роботі [9] автори пропонують використовувати азот в суміші з хладоном, для гасіння пожеж при катастрофах літаків, а в роботі [10] для продувки внутрішніх технологічних об'ємів. Розробники [11] використовували для пожежогасіння спільну подачу азоту разом з дисперсною водою, так само як і в роботі [12], де автори пропонують сумісну подачу азоту з водою в спринклерних системах, або в роботі [13] також спільну подачу азоту і води, але вже у вигляді водяного туману. У всіх випадках азот використовували для зменшення концентрації кисню, що приводить до підвищення ефективності гасіння другим компонентом, як правило інгібітором.

Аналіз загальних закономірностей процесів інгібування показує, що підвищити ефективність інгібувальних засобів можна, знизивши вміст окислювача в горючій суміші. Знизити концентрацію окислювача достатньо не у всьому приміщенні, а тільки в зоні горіння. Таким чином, негорючі газоподібні компоненти додатково розбавляють горючу систему, знижують концентрацію кисню і тим самим різко підвищують ефективність вогнегасної дії інгібітора. Наприклад, розбавлення суміші «природний газ+повітря» на 10 % азотом знижує вогнегасну концентрацію хладону в 2 рази, а при розбавленні на 20 % вогнегасна концентрація хладону становить всього 0,5–0,6 % [14].

Крім цього при добавлянні теплових флегматизаторів до хімічних інгібіторів вогнегасна ефективність останніх різко збільшується, як заявляють автори роботи [15]. Подібний ефект спостерігається і при використанні CO_2 [16] де автори пояснюють це тим, що із зменшенням концентрації кисню в повітрі, різко збільшується ефективність дії інгібіторів, і в результаті флегматизувальна концентрація CO_2 зменшується до 8 % при концентрації аерозолі в 15 г/м³. Отже, механізм об'ємного гасіння аерозолем з добавкою газів доречно розглядати за принципом комбінованої дії вогнегасних засобів, які поєднують в собі ефекти охолодження та інгібування, що приводить до значного кінцевого вогнегасного ефекту.

Проведений аналіз, щодо сумісної дії газових розріджувачів та твердих дисперсних інгібіторів, які утворюють аерозоль, підтверджує сумарну синергетичну дію компонентів бінарної газо-аерозольної системи. Таким чином, вплив азоту на вогнегасну ефективність аерозолів є відкритим питанням, яке потребує теоретичного аналізу характеристик аерозолі та експериментального визначення вогнегасної ефективності бінарних сумішей аерозолі та азоту.

Азот, як вогнегасний компонент, досліджено багатьма дослідниками зокрема авторами роботи [17]. Вони перевірили ефективність придушення вогню газоподібним азотом за допомогою різних повномасштабних вогневих випробувань. Об'єм випробувальної камери становив 102 м³. Випробування проводилися за концентрації азоту $C_{гас}=33,6$ об. % та мінімальної концентрації кисню 13,9 %. У жодному з 10 тестів не відбулося повторного загоряння зразка. Тести проводили на зразках-представниках кожного з класів пожеж. В табл. 1 представлені дані з гасіння класу С – на кабелях з поліетиленовою ізоляцією.

Таблиця 1

Результати тесту гасіння [17]

Агент	$C_{\text{гас}}, \% \text{ об}$	Час, с	Фіксація повторного загоряння	Час догорання, с
Nitrogen IG-100	39.1	11	Так	3
IG-541	40.2	13	Так	6
m-200	1.6	6	Так	Кілька сек
HFC-23	15.9	6	Так	Кілька сек

Слід зазначити, що у випадку подавання інертного розріджувача у замкнене герметичне приміщення, повітряне середовище може залишатися придатним для дихання і збереження життя людей аж до гасіння пожежі. Забезпечити життєбезпечну концентрацію кисню може застосування комбінованих аерозольно-газових систем концентрація газу та аерозолі в яких має бути на порядок меншою за необхідну вогнегасну.

Відомо [18], що при спалюванні АУС з кожного його грама утворюється 0,3–0,5 л аерозолі, який складається з дисперсних частинок неорганічних солей калію, натрію, кальцію та інш., та суміші інертних газів флегматизаторів – CO_2 , N_2 , водяної пари та інш. При взаємодії цих частинок утворюється складна система, структура і склад якої постійно змінюється в часі. Так, в момент утворення газо-аерозольної системи вона складається з ультрадисперсних часточок солей калію, які можуть формувати структури з вмістом води та CO_2 . Такі структури будуть чинити набагато ефективнішу вогнепридушуючу дію завдяки комбінованій дії інгібіторів та флегматизаторів [18].

В роботі [19] результати досліджень показали, що вогнегасна ефективність аерозолів не залежить від порядку введення інертних газів, а залежить тільки від їх концентрації, і навіть незначна кількість введеного інертного газу в об'єм твердофазового аерозолі суттєво знижує вогнегасну концентрацію останнього.

На користь комбінованого характеру гасіння, як приклад, можна також привести дані роботи [20] про те, що наявність інертних газових розріджувачів значно підвищує ефективність аерозолі. Результати дослідів [19, 20] показали ще один досить вагомий ефект від додаткового використання інертних розріджувачів сумісно з аерозолем, а саме – наявність CO_2 чи N_2 збільшує оптичну проникність аерозолі, тобто збільшується видимість. Особливо це відчутно при концентраціях CO_2 чи N_2 від 2 % і більше. З практичної точки зору це має важливе значення. При вирішенні питання, який інертний газ краще використовувати, стає очевидним те, що азот, в силу його малої токсичності, має безумовну перевагу над CO_2 , хоча його допоміжна дія дещо нижча від CO_2 . Якщо ж стоїть питання про гасіння в безлюдних об'ємах, то, без сумніву, застосування CO_2 має переваги перед N_2 .

Таким чином, не враховуючи концентрацію твердої фази, добавка до неї таких газів, як CO_2 , N_2 чи H_2O повинна дещо підвищити теплопоглинальну здатність бінарної суміші аерозолі та газів флегматизаторів. Що підтверджено в роботі [21] в якій вказано, що сам аерозоль проявляє підвищену теплопоглинальну дію при концентраціях вищих за 50 г/м^3 , а при концентрації аерозолі близько $80\text{--}100 \text{ г/м}^3$ призводить до зменшення температури від 2100 К до $1700\text{--}1400 \text{ К}$

при дії самих аерозолів так із добавкою газів, причому добавка CO_2 призводила до більшого зменшення температури. Автори роботи [22] теж підтвердили значне підвищення вогнегасної ефективності бінарної суміші інгібіторів горіння та газів флегматизаторів, завдяки теплофізичним якостям газів-флегматизаторів.

Питання пошуку нових вогнегасних речовин та синергізму між хімічними та фізичними вогнегасними агентами також вивчалось авторами [23], які шукали нову екологічно чисту вогнегасну речовину, в якій хотіли зберегти всі «корисні властивості» Галона-1301, але цей пошук не був успішним, так як отриманий вогнегасний агент 1-бром-3,3,3-трифторпропан не відповідав заявленим вимогам – мав низьку вогнегасну концентрацію, низьку температуру кипіння, високу вартість, і т. д. Згідно результатів досліджень тих же авторів [23], лише суміш 1-бром-3,3,3-трифторпропану з азотом володіла високою вогнегасною ефективністю за рахунок синергізму між її компонентами. З метою отримання «екологічно» чистих вогнегасних агентів дослідники пропонують використовувати зріджений азот [24, 25], який, як вони вказують, може використовуватись для гасіння будівель та пожеж в резервуарах. Але виникає питання до технологічного втілення такого способу гасіння, який звичайно буде більш вартісним за звичайне зберігання стисненого азоту в балонах. Щодо вогнегасної ефективності азоту, то його необхідно використовувати як газ, що знижує концентрацію кисню, причому подавати його можна різними способами, але загалом необхідно, щоб газ потрапляв в зону горіння. Так, автори [26] проводили дослідження ефективності гасіння мильними бульбашками – капсулами, які на їхню думку призведуть до зменшення витрат газу на гасіння. Таким чином, як видно з проведеного аналізу, дослідники працюють над завданням зменшення вогнегасної концентрації газу, який подається на гасіння, причому задіюють різні способи та прийоми, які мають свої відповідні зазначені вище недоліки.

Переходячи до сумісного застосування аерозолі та азоту, необхідно розглянути теплотехнічні характеристики аерозолі. Так, в роботі [27] порівнювали одержані розрахункові значення теплоємності АУС з теплоємностями газів-флегматизаторів CO_2 і N_2 при температурі полум'я в 1400°C , які становлять відповідно $Q=3241 \text{ кДж/м}^3$ та $Q=2012,5 \text{ кДж/м}^3$. З результатів роботи видно, що теплоємність аерозолі значно перевищує теплоємність цих газів і особливо у випадках утворення K_2CO_3 чи $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Так, наприклад, для зарядів із надлишком пального, що відповідає стехіометричному коефіцієнту при пальному $n=1,5$, теплоємність 1 м^3 аерозолі з АУС на основі ідітолу, лактози, вуглецю (при умові утворення K_2CO_3) є в декілька раз більшою від теплоємності $1 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$, N_2 (табл. 2) [26].

Таблиця 2

Відношення величини теплоємності аерозолі до інертних газів [26]

Газ \ АУС	Ідітол – 20 % KNO_3 – 80 %	Лактоза – 28 % KNO_3 – 72 %	Вуглець – 20 % KNO_3 – 80 %
CO_2	<2,85	<2,11	<3,42
N_2	<4,59	<3,40	<5,51

Як видно з табл. 2, розрахункова теплопоглинальна здатність аерозолію є як мінімум в 2,11 рази вищою за теплопоглинальну здатність CO_2 , та в 3 рази – за теплоємність азоту, що збігається з результатами авторів [21], які вказують на високу теплопоглинальну здатність аерозолів при високих концентраціях. Отриманні характеристики аерозолів створюють передумови для їх використання в бінарних вогнегасних системах за рахунок підсилення їх вогнегасних якостей при добавлянні газових теплових флегматизаторів – зокрема азоту.

Таким чином, вплив добавок азоту на вогнегасну ефективність аерозолів на основі неорганічних солей калію, особливості гасіння та характеристики бінарних аерозольноазотних сумішей є недостатньо вивченим питанням, яке підтверджує необхідність проведення досліджень у вказаному напрямку.

3. Мета та завдання роботи

Метою роботи є визначення вогнегасної ефективності та особливостей, гасіння дифузійного полум'я гептану бінарною аерозольно-азотною сумішшю в умовах експериментальної камери.

Для досягнення заявленої мети потрібно:

- розробити експериментальну установку та методику для визначення вогнегасної ефективності бінарної аерозольно-азотної суміші;
- визначити вогнегасну ефективність та співвідношення компонентів бінарної аерозоль-азотної суміші;
- визначити особливості процесу гасіння при різних концентраціях та співвідношеннях компонентів бінарної аерозольно-азотної суміші;
- визначити інтенсивність та особливості охолодження кінетичного та дифузійного полум'я гептану при перебуванні його в бінарній аерозольно-азотній суміші.

4. Матеріали та методи дослідження особливості процесу гасіння та вогнегасної ефективності бінарної аерозольно-азотної суміші

Для визначення вогнегасної ефективності та особливостей гасіння запропонованою бінарною аерозольно-азотною сумішшю (БААС) використали такі матеріали та пристрої. Аерозольутворювальна суміш, що складається з ідітолу ($\text{C}_{13}\text{H}_{12}\text{O}_2$) – 20 % та нітрату калію (KNO_3) – 80 %. АУС готують попереднім подрібненням перемішуванням та пресуванням відповідної ваги заряду. Азот, N_2 , хімічно чистий на 99,96 %. Для визначення особливостей гасіння проводили відеофіксацію фотокамерою Nikon 1 J4, з можливістю зйомки 3 секундних відеороликів з частотою кадрів від 60 до 1200 за 1 секунду при роздільній здатності 416×144 Р [28]. За допомогою цієї камери при розкадровці відеороликів визначали частоту пульсації полум'я. Змінення температури визначали за допомогою хромель-алюмелевої термопари з товщиною провідника 0,3 мм та регулятора перетворювача РТ-0102. Дані отримані в вигляді цифрових показників на інтерфейсі програмі РП-8 розробник ПАТ НВО «Львівтермоприлад» в Windows (рис. 1).

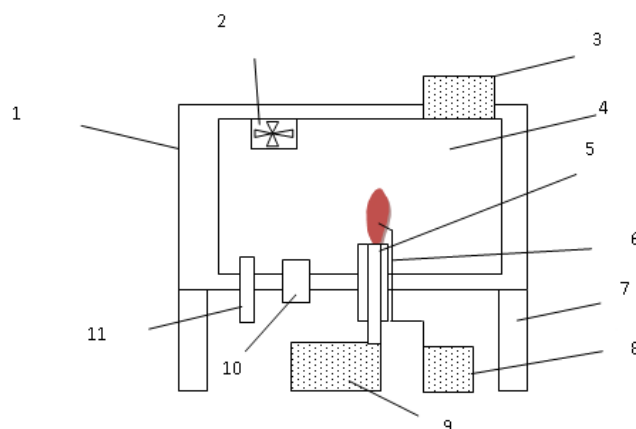


Рис. 1. Експериментальна установка для визначення вогнегасної ефективності БААС: 1 – корпус камери; 2 – вентилятор; 3 – отвір для продувки посудини; 4 – оглядове вікно; 5 – гептановий пальник; 6 – термопара хром ель-алюмелева; 7 – стійки; 8 – регулятор – перетворювач 01–02; 9 – підігрівачий резервуар з гептаном; 10 – джерело запалювання АУС; 11 – труба подачі газу

Визначення ефективності гасіння проводили таким чином. В камері спалювали відповідну наважку АУС, добавляли відповідну кількість азоту, перемішували суміш і через отвір вводили гептановий пальник та реєстрували результат «гасіння», «не гасіння», «відрив полум'я». Охолоджувальну ефективність вогнегасної суміші визначали за допомогою гептанового пальника з прикріпленою термопарою, сигнал від якої передавався на регулятор – вимірювач 0102 (рис. 1) а з нього на програму РП-8, на якій отримували цифрове значення інтенсивності зниження температури.

5. Результати досліджень показників. Вплив співвідношення аерозолію та азоту на вогнегасну ефективність БААС при гасінні дифузійного полум'я гептану

Для підтвердження того, що сумісна дія аерозолію з добавками азоту приведе до значного підвищення вогнегасної ефективності кінцевої бінарної аерозольно-азотної суміші, було проведено серію експериментів та отримано відповідні залежності, які показані на рис. 2. Графік залежності вогнегасної концентрації був побудований з умовою, що вогнегасна концентрація аерозолію, утвореного з АУС на основі ідітолу, для гептану становить 25 г/м^3 , а азоту для гептану – 33 % [9, 10, 12, 16].

На рис. 2 наведено графік залежності зміни вогнегасної концентрації для дифузійного полум'я гептану від співвідношення вмісту вогнегасного аерозолію, та азоту за їх сумісного комбінованого подавання у випробувальну камеру.

Як видно з графіка, експериментальні значення компонентів БААС, розташовані нижче значень у разі адитивності, відповідно зафіксовано синергізм між компонентами БААС.

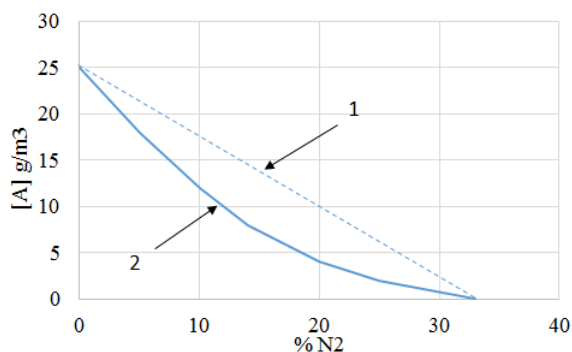


Рис. 2. Графік змінення вогнегасної концентрації БААС для дифузійного полум'я гептану, залежно від концентрації аерозолу — $[A]$ г/м³ та азоту — N_2 %:
1 — пряма залежності (теоретична) у разі адитивності;
2 — крива залежності за експериментальними даними

3.5. Залежність вогнегасної ефективності БААС при гасінні кінетичного полум'я гептану, від зміни концентрації N_2 при сталій концентрації аерозолу в 45 г/м³

Для виявлення особливостей гасіння, залежностей та вогнегасної ефективності БААС від зміни концентрації азоту в ній, було проведено дослідження зміни температури при впливі на кінетичне полум'я БААС з співвідношенням аерозолу 45 г/м³ та добавками азоту 5, 10, та 15 %. Кінетичне полум'я отримували, завчасно перемішуючи пару гептану з повітрям на відповідному пальнику.

Далі було досліджено вогнегасну дію на кінетичне полум'я БААС. При дії на кінетичне полум'я БААС з концентраціями до 100 г/м³ і добавкою азоту до 30 % досягнути гасіння такого полум'я не вдавалось. Полум'я набувало блакитного забарвлення, швидкість його зменшувалась, воно незначно відривалось, але процес горіння продовжувався.

На рис. 3 показано динаміку зменшення температури при добавлянні зазначених кількостей азоту. У всіх випадках температура полум'я при внесенні його в БААС різко зменшувалась. Мінімально температура зменшувалась на 50 °C при внесенні пальника в чистий аерозоль та максимально майже на 200 °C при внесенні пальника в БААС з співвідношенням аерозолу 45 г/м³ азоту — 15 %.

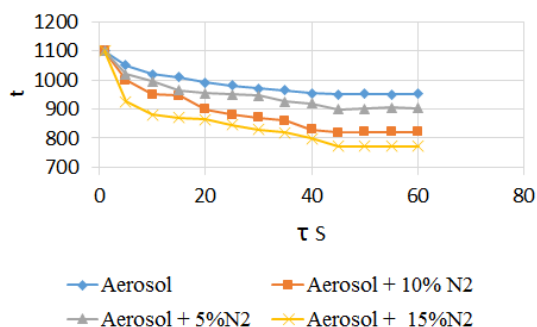


Рис. 3. Залежність зміни температури (t) кінетичного полум'я гептану в часі (τ с) залежно від концентрації азоту при сталій концентрації аерозолу в БААС — 45 г/м³

Далі було проведено дослідження з визначення впливу БААС на температуру гептанового дифузійного полум'я. Отримані результати показані на рис. 4.

Як видно з результатів експерименту, охолоджувальна ефективність аерозолу з добавкою різної концентрації азоту є незначною, але все ж таки, зменшує температуру дифузійного гептанового полум'я (рис. 4). Сам аерозоль зменшує температуру полум'я теж приблизно на 40 °C при концентрації лише 10 г/м³. При добавлянні 2,5 % азоту до аерозолу температура полум'я у перші 5 секунд зменшується приблизно на 50 °C. Подальше добавляння 5 % азоту призводить до зниження температури за перших 5 секунд до 65 °C спочатку і пізніше загалом до 70 °C. При найбільшому збільшенні концентрації азоту до 10 % відбувається більш різке зниження температури полум'я на приблизно 75 °C, і в кінцевому результаті температура зменшується загалом на 100 °C, до 565 °C. Таким чином зниження температури при добавці азоту відбувається, але не досить значне, і загалом динаміка зменшення температури полум'я не дуже відрізняється від зниження температури при нижчих концентраціях азоту. Для підтвердження того, що дія БААС завдає комбінованого впливу на кінетичне та дифузійне полум'я, було визначено особливості гасіння аерозолем та аерозольно-азотною сумішшю.

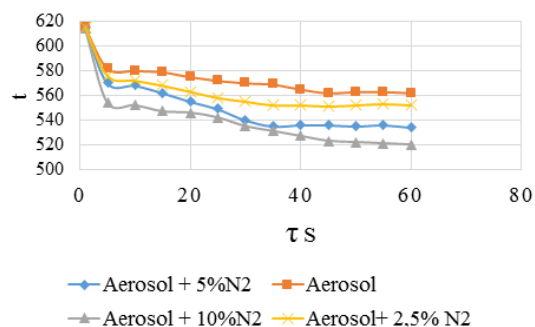


Рис. 4. Залежність зміни температури (t) дифузійного полум'я гептану в часі (τ с) залежно від концентрації азоту при сталій концентрації аерозолу в БААС — 10 г/м³

Результати розкадровки показані на рис. 5. Як видно з рис. 5 поз. 1, при гасінні кінетичного полум'я відбувається спочатку змінення кольору полум'я після чого полум'я незначно відривається та повертається в стабільний стан. Відрив відбувається на 25–60 секунд. При цьому в цей момент температура полум'я знижується майже на 150 °C.

Далі показано процес розкадровки гасіння аерозольно-азотною сумішшю. Для визначення особливостей впливу БААС на кінетичне та дифузійне полум'я було проведено відеофіксацію гасіння БААС камерою NIKON 1J4 з частотою кадрів 120 на секунду. Результати розкадровки дифузійного полум'я гептану БААС із співвідношенням аерозолу — 15 г/м³ та азоту — 7,5 % показано на рис. 5. На рис. 6 показано вплив на кінетичне полум'я БААС з співвідношенням аерозолу — 45 г/м³ та азоту від 10 % до 20 %.

При гасінні дифузійного полум'я (рис. 5) воно слабо забарвлювалось, після чого воно починало пульсувати, рис. 5, поз. 1–4, зменшувалось у розмірах рис. 5, поз. 5, та гасло. Зріз пальника показано на рис. 5, 6 горизонтальною рисою, а розміри полум'я (рис. 5) та його відрив (рис. 6) показані стрілками.

Загалом поведінка дифузійного та кінетичного полум'я при дії на них БААС є різною, зважаючи на

те, що кінетичне полум'я загасити БААС навіть при знаних концентраціях не вдається, а дифузійне полум'я гаситься при низьких концентраціях компонентів БААС. Ймовірною причиною цього є те, що повітря в кінетичне полум'я потрапляє ззовні установки без БААС, а в дифузійне разом з БААС з середини установки, що приводить до різниці в температурі горіння, яка для кінетичного полум'я є близько 1100°C , а для дифузійного, – в два рази меншою та становить 615°C . При цьому, при добавлянні до аерозолу азоту гасіння дифузійного полум'я відбувається не його відривом, а в результаті збільшення частоти пульсацій до 24–35 Гц, що було визначено методом відеофіксації. Полум'я в процесі пульсування зменшується в розмірі і гасне (рис. 5, поз. 5).

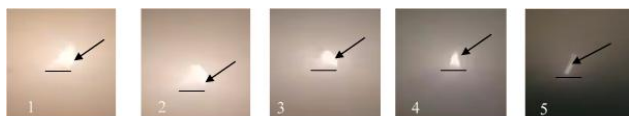


Рис. 5. Процес гасіння дифузійного полум'я гептану БААС при співвідношенні аерозоль – 15 г/м^3 , N_2 – 7,5 %:
1–4 пульсування полум'я з частотою 24–35 Гц;
5 – пульсування, зменшення розмірів та гасіння полум'я внаслідок пульсацій

Як видно з рис. 6, поз. 1 при дії на кінетичне полум'я БААС відбувається спочатку зміння кольору полум'я, подеколи воно незначно відривається та згодом повертається у вихідне становище і продовжує горіти. Причому при збільшенні кількості азоту до 15 % (рис. 6, поз. 2) відрив максимальний становить 4 мм, та при 20 % (рис. 6, поз. 3) воно відривається до 12 мм, що показано стрілкою, (горизонтальною рисою позначено зріз пальника). Незначний нахил полум'я вліво спричинено роботою вентилятора.



Рис. 6. Вплив БААС на кінетичне полум'я гептану:
1 – горіння полум'я при добавці БААС (аерозоль – 45 г/м^3 , азот – 10 %); 2 – відрив полум'я на 4 мм при добавці БААС (аерозоль – 45 г/м^3 , азот – 15 %); 3 – відрив полум'я на 12 мм при добавці БААС (аерозоль – 45 г/м^3 , азот – 20 %)

Виходячи з результатів досліджень, можна констатувати цікаві закономірності, які полягають у невеликій різниці значень, на які знижується температура, як дифузійного так і кінетичного полум'я при дії на них БААС з значною різницею в концентраціях аерозолу та азоту. Особливість полягає в тому, що БААС при взаємодії з кінетичним полум'ям швидше всього не потрапляє у великій кількості всередину нього, але приводить до зниження його температури за рахунок обтікання самого полум'я. Також цікавим є те що БААС загасити кінетичне полум'я гептану неможливо навіть при великих її концентраціях, в той же час дифузійне полум'я гаситься при цьому значно легше, а різниця в концентраціях БААС складає до 4 разів.

6. Обговорення результатів дослідження впливу добавок азоту на вогнегасну ефективність та особливості гасіння БААС кінетичного та дифузійного полум'я гептану

При визначенні ефективності впливу азоту на вогнегасну ефективність бінарної аерозольноазотної суміші, як витікає з отриманих результатів (рис. 3), закономірним є спільне зменшення вогнегасних концентрацій аерозолу та азоту. Це обумовлено синергічною дією між компонентами БААС завдяки розбавленню горючого середовища газом флегматизатором та значним зростанням інгібуючої дії аерозолу. Внесення дифузійного полум'я гептану в камеру з БААС, коли повітря подається в горючу суміш ззовні при стехіометричному співвідношенні горючого та окисника, не призводить до його гасіння навіть при значних концентраціях БААС. Причому, як витікає з результатів експерименту, для гарантованого гасіння, газозааерозольна суміш обов'язково повинна потрапляти всередину полум'я в зазначеній кількості разом з повітрям. Потраплення аерозольно-азотної суміші всередину полум'я разом з повітрям призводить до значнішого зниження температури, ніж при внесенні кінетичного полум'я гептану всередину БААС коли повітря подається ззовні при концентрації аерозолу в 4 рази меншою. Таким чином, зниження температури полум'я відбувається через комплексну інгібуючо-охолоджувальну дію компонентів БААС на полум'я.

На основі результатів вимірювань температури кінетичного полум'я (рис. 3) можна сказати, що сам аерозоль (рис. 3) не чинить при невисоких концентраціях значної вогнепридушуючої дії, і лише при збільшенні концентрації аерозолу, його вогнегасна дія значно зростає, що призводить до ймовірного більшого охолоджувального ефекту. Причому при внесенні в аерозоль гептанового пальника з кінетичним полум'ям, його температура різко знижувалась приблизно на 120°C , на 10 секунд, що видно з графіка на рис. 3, але це не призводило до його гасіння. Далі температура дифузійного полум'я незначно зменшувалась, та стабілізувалась на значенні приблизно в 950°C . Добавляння до аерозолу азоту в кількості 5 % призводило до зменшення температури на початку до 1000°C що видно з графіка на рис. 3. після чого температура стабілізувалась на позначці 905°C . Подальше збільшення концентрації азоту до 10 % призвело до зменшення температури в кінцевому результаті, до позначки 887°C , а добавка 15 % призвела до зниження температури до 866°C , причому зниження температури на перших 10 секундах відбулось навіть більше, до 849°C а потім температура стабілізувалась на позначці 866°C .

Вимірювання температури дифузійного полум'я показали подібні результати (рис. 5) і при добавлянні самого аерозолу при концентрації 10 % температура полум'я знижувалась з 620°C до 580 на 5 секунд, після чого температура зменшувалась ще приблизно до 560°C та стабілізувалась на 40 секунд на значенні в 564°C . Полум'я при цьому зменшувалось в розмірах та пульсувало з частотою 3–8 Гц. Добавляння 2,5 % азоту до аерозолу призвело до більшого зменшення температури в момент внесення полум'я в БААС, далі також відбувалось зниження температури та на 35 секунд температура стабілізувалась на позначці при-

близко 553 °C. Збільшення концентрації азоту в БААС з 2.5 % до 5 % призвело до більш різкого зниження температури, при внесенні палика всередину камери на 5 секунд температура знизилась до 568 °C, після чого так ж само продовжилось незначне зниження температури, яка стабілізувалась на 540 °C. При збільшенні в БААС концентрації азоту до 10 % початкове зменшення температури продовжувалось ще більше та сягнуло до 554 °C, після чого температура стабілізувалась на 522 °C. Полум'я при цьому значно зменшилось в розмірах та перейшло в нестабільний стан – пульсувало з частотою близько 8–12 Гц, частково відривалось та знову стабілізувалось. Таким чином, гасіння полум'я відбувалось при зменшенні його розмірів та внаслідок пульсації, а не відриву, при цьому температура зменшувалась максимум на 250 °C від початкової.

Результати розкадровки процесу гасіння аерозолем та аерозолем з добавкою азоту показали, що аерозоль без добавки азоту забезпечує зміну кольору дифузійного полум'я та подальше його гасіння. Добавка до аерозолу від 5 до 12 % азоту призводить до зміни в механізмі гасіння, яка полягає у пришвидшенні моменту нестабільності полум'я збільшення частоти його пульсації до 24–35 Гц та швидшого гасіння після незначного нестабільного стану за час на 30 % менший, ніж без добавки азоту. Причому полум'я як було зазначено, не гасилось, а збільшення концентрації N_2 в БААС призводило до незначного збільшення відриву та теж незначного зменшення розмірів полум'я (рис. 6, поз. 1–3).

Як видно з результатів експерименту дія БААС на кінетичне та дифузійне полум'я не призводить до його сильного та різкого охолодження, а максимальне зменшення температури становить близько 230 °C, але при цьому полум'я не гасло. Таким чином, дія БААС ймовірно приводить до зменшення теплоутворення завдяки розбавленню атмосфери азотом і добре погоджується з результатами авторів [29], де вони теж вказали на зниження температури в результаті дії суміші хладону та вуглекислого газу на вуглеводневе полум'я. Подальше збільшення концентрації аерозолу і азоту призводить спочатку до більш різкого зменшення температури, але вона зменшується далі протягом 30–40 секунд від внесення палика в полум'я, після чого воно стабілізується. Це можна пояснити зменшенням ефективності теплоутворення реакції, та можливо незначним збільшенням концентрації продуктів горіння гептану та охолодженням аерозолу.

Співставлення результатів зміни температури при внесенні в аерозоль дифузійного полум'я гептану та аерозолу з добавкою азоту теж призводить до зменшення температури в зазначеному діапазоні – тобто температура при введенні палика зменшується приблизно на 100 °C, після чого полум'я відривається і гасне. Таким чином, незважаючи на те, що дію БААС ще необхідно досліджувати та визначити домінуючий механізм гасіння, вона володіє значною вогнегасною ефективністю, яка є значно вищою за вогнегасну ефективність окремо взятих компонентів БААС аерозолу та азоту.

Таким чином, отримані дані щодо значень вогнегасної ефективності та особливостей гасіння БААС мо-

жуть бути основою для створення екологічно чистих вогнегасних систем для гасіння горючих гомогенних та гетерогенних середовищ. Визначені співвідношення аерозолу та азоту забезпечують задовільні умови для життєдіяльності людини при гасінні пожеж у замкнених об'ємах. При застосуванні для гасіння БААС концентрація кисню в захищуваному приміщенні не знижується нижче 16 %, що дає змогу перебувати нетривалий час людям всередині цього об'єму. Сам аерозоль не чинить сильної токсичної дії [30] при вогнегасних концентраціях – 40–50 г/м³ і при меншій концентрації в суміші з нейтральним екологічно чистим азотом підходить як альтернатива вогнегасного компонента для автоматичних систем для забезпечення гасіння об'ємів з перебуванням людей та живих організмів.

7. Висновки

1. Розроблено експериментальну методику та установку для визначення вогнегасної ефективності бінарних аерозольно-азотних сумішей, в якій для дослідження вогнегасної ефективності бінарної аерозольно-азотної суміші використано два види полум'я – дифузійне та кінетичне.

2. Визначено вогнегасну ефективність бінарної аерозольно-азотної суміші та встановлено, що добавка азоту до аерозолу неорганічних солей калію призводить до значного підвищення вогнегасної ефективності бінарної аерозольно-газової суміші завдяки синергізму між її компонентами. Результатом добавлення до аерозолу азоту стало зменшення вогнегасної концентрації компонентів бінарної суміші до 30 %. Визначено, що оптимальні співвідношення компонентів в аерозольно-азотній суміші становлять: аерозоль – 10 г/м³, азоту – 12,1 %, при яких суміш є вогнегасною, для дифузійного полум'я гептану та забезпечує збереження життєпридатної концентрації кисню.

3. Встановлено, що гасіння дифузійного полум'я гептану відбувається не через його відрив, а через його зменшення в розмірах та пульсації при частотах 24–35 Гц. Виявлено, що внесення кінетичного полум'я гептану в БААС при концентраціях які значно переважають вогнегасні для дифузійного полум'я гептану, до гасіння не приводило.

4. Визначено інтенсивність та значення зменшення температури дифузійного та кінетичного полум'я при перебуванні його в бінарній аерозольно-азотній суміші. Різниця температур між початковим значенням температури та під дією БААС становить максимум 230 °C. Зниження температури відбувається внаслідок того, що добавка БААС ймовірно призводить до зменшення тепловиділення реакції горіння і, як наслідок, зменшення температури полум'я.

Отримані залежності та характеристики аерозольно-азотних сумішей можуть бути підґрунтям для створення екологічно чистих, дешевих, та простих у виробництві та експлуатації засобів пожежогасіння з високою вогнегасною ефективністю, які можна застосовувати для гасіння об'ємів з тимчасовим перебуванням людей та живих організмів без завдання видимої шкоди для них в результаті об'ємного пожежогасіння зазначеними сумішами.

Література

1. Агафонов, В. В. Установки аэрозольного пожаротушения: Элементы и характеристики, проектирование, монтаж и эксплуатация [Текст] / В. В. Агафонов, Н. П. Копылов. – М.: ВНИИПО, 1999. – 232 с.
2. Агафонов, В. В. Обоснование механизма подавления газофазного горения аэрозолями и пути повышения их огнетушащей способности [Текст: материалы 16 Всероссийской научн.-техн. конф. / В. В. Агафонов, Н. П. Копылов. – М.: ВНИИПО, 2001. – С. 91–96.
3. Коростелёв, В. Г. Аэрозольгенерирующие пожаротушащие составы. Основные типы составов и оптимальные условия их применения [Текст] / В. Г. Коростелёв // Пожаровзрывобезопасность. – 2002. – № 1. – С. 61–66.
4. Аэрозольный огнетушащий состав. Пат. № 2121857 Рос. Федерация [Текст] / Раев В. И. – Кл. А62D 1/00, 1/02 опубл. 1998 г.
5. Кіотський протокол до Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату (укр/рос) ООН [Текст]. – Протокол, Міжнародний документ від 11.12.1997.
6. Монреальський протокол про речовини, що руйнують озоновий шар ООН [Текст]. – Протокол, Акт, Резолюція від 16.09.1987.
7. Tapscott, R. E. Halon replacement research – a historical review of technical progress and regulatory decision points [Text] / R. E. Tapscott, T. A. Moore, J. D. Mather // Halon Options Technical Working Conference, 1998. – P. 17–22.
8. Taylor, G. Time is Up for Halons [Text] / G. Taylor // Industrial Fire Journal. – 2001. – Issue 41. – P. 63–64, 67–68.
9. U.S. Department of Transportation Federal Aviation [Text]. – Administration Final Report Options to the Use of Halons for Aircraft Fire Suppression Systems. Update, 2002.
10. Book, N. L. Inerting or purging. Instructional module [Text] / N. L. Book, O. C. Sitton, D. K. Ludlow. – Department of Chemical Engineering University of Missouri–Rolla, 2000.
11. Vortex The Only Hybrid Nitrogen–Water Fire Suppression System [Electronic resource]. – Available at: <http://www.firesafetyinc.com/PDFs/Vortex%20Brochure.pdf>
12. Forssell, E. W. False Deck Development Testing of Hybrid Nitrogen – Water Mist Fire Suppression Systems [Text] / E. W. Forssell, J. L. Scheffey, P. J. DiNenno, G. G. Back // Halon Options Technical Working Conference (HOTWC), New Mexico Engineering Research Institute (NMERI), Albuquerque, NM, 2004.
13. Система автоматического пожаротушения «Защитный туман» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.startbase.ru/innovations/63/>
14. Абдурагимов И. М. Физические и химические основы развития и тушения пожаров. ВПТШ СССР [Текст] / И. М. Абдурагимов, В. Г. Говоров, В. Е. Макаров – Москва: ВПТШ МВД СССР, 1980. – 255 с.
15. Lott, J. L. Synergism Between Chemical and Physical Fire–Suppressant Agents [Text] / J. L. Lott, S. D. Christian, C. M. Sliepcevich, E. E. Tucker // Fire Technology. – 1996. – Vol. 32, Issue 3. – P. 260–271. doi: 10.1007/bf01040218
16. Balanyuk, V. M. Phlegmatisation of flammable gas mixtures by aerosol sprays. Flegmatyzacja aerosolami mieszanin palnych [Text] / V. M. Balanyuk, D. A. Zhurbinskiy // ВІТР. – 2013. – Vol. 32, Issue 4. – P. 53–58.
17. Moore, T. A. Nitrogen gas as a halon replacement [Text] / T. A. Moore, N. Yamada // Halon Options Technical Working Conference, 1998. – P. 330–338.
18. Журбинський, Д. А. Флегматизування газових горючих середовищ сумішами вогнегасних аерозолів та газових вогнегасних речовин [Текст] автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. А. Журбинський. – Л., 2014. – 19 с.
19. Баланюк, В. М. Вплив газової фази на ефективність вогнегасних аерозолів [Текст] / В. М. Баланюк, Б. Т. Грималюк, Ю. В. Кіт, С. С. Левуш // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – 2004. – № 497. – С. 11–12.
20. Баланюк, В. М. Дослідження впливу інертних газових розріджувачів на ефективність вогнегасних аерозолів [Текст] / В. М. Баланюк, Б. Т. Грималюк // Пожежна безпека. – 2004. – № 5. – С. 18–24.
21. Agafonov, S. N. The mechanism of fire suppression by condensed aerosols [Text] / S. N. Agafonov, A. V. Kopylov, V. F. Sychev, D. B. Uglov, D. B. Zhyganov // Halon Options Technical Working Conference, 15th Proceedings. HOTWC, 2005. – P. 1–10.
22. Жартовський, В. М. Дослідження з визначення вогнегасної ефективності сумішей інгібіторів горіння та інертних розріджувачів [Текст] / В. М. Жартовський, М. Я. Откідач, Ю. В. Цапко, О. Г. Тропінов // Науковий вісник. – 2003. – № 2. – С. 5–10.
23. Yongfeng, Z. Experimental study of the fire-extinguishing effectiveness of 1–bromo–3,3,3–trifluoropropene/nitrogen mixtures [Text] / Z. Yongfeng, J. Xiang, L. Guangxuan, X. Ni // Journal of fire sciences. – 2007. – Vol. 25. – P. 177–187. doi: 10.1177/0734904107067914
24. McGuire, J. H. Fighting building fires with liquid–nitrogen: a literature survey [Text] / J. H. McGuire // Fire Safety Journal. – 1981. – Vol. 4, Issue 1. – P. 15–19. doi: 10.1016/0379-7112(81)90003-5
25. Levendis, Y. Cryogenic extinguishment of liquid pool fires [Text] / Y. Levendis, A. Ergut, M. Delichatsios // Process Safety Progress. – 2010. – Vol. 29. – P. 79–86. doi: 10.1002/prs.10349
26. Torikai, H. Extinguishment of a Laminar Jet Diffusion Flame Using a Soap Bubble Filled with Nitrogen Gas [Text] / H. Torikai, T. Murashita, A. Ito, T. Metoki // Fire Safety Science. – 2011. – Vol. 10. – P. 557–567. doi: 10.3801/iafss.fss.10-557
27. Копистинський, Ю. О. Перебіг окремих внутрішніх процесів у вогнегасних аерозолях під час гасіння дифузійного полум'я [Текст] / Ю. О. Копистинський, В. М. Баланюк, О. І. Лавренюк, Д. А. Журбинський // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2008. – № 1 (17). – С. 155–159.
28. Фотокамера NIKON1 J4 [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://imaging.nikon.com/lineup/acil/bodies/j4/spec.htm>
29. Saito, N. Fire Extinguishing Effect Of Mixed Agents Of Halon 1301 And Inert Gases [Text] / N. Saito, Y. Saso, Y. Ogawa, Y. Otsu, H. Kikui // Fire Safety Science. – 1997. – Vol. 5. – P. 901–910. doi: 10.3801/iafss.fss.5-901
30. Иличкин, В. С. Экспериментальное определение и оценка показателей токсической опасности огнетушащих аэрозолей [Текст] / В. С. Иличкин, Н. П. Копылов, Б. В. Потанин // Пожарная безопасность. – 2002. – № 4. – С. 75–79.